

车用直喷柴油机 NO_x 和微粒排放的净化对策

陈 剑

(上海师范大学 犹他科技学院, 上海 200234)

摘 要: 阐述了机内优化燃烧过程是车用直喷柴油机排放净化的根本途径, 介绍了通过电控技术对喷油系统、进气系统、废气再循环以及增压、中冷的有效控制来实现优化燃烧过程的可能性。

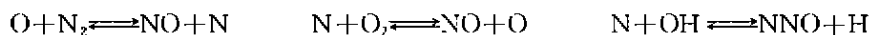
关键词: 直喷柴油机; 排气净化; 燃烧控制

中图分类号: TK411.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-5137(2001)02-0043-05

直喷柴油机因其燃油经济性好, CO₂排放量低而得到广泛的使用。由于柴油机和汽油机的燃料和燃烧方式不同, 他们的排气有害成分也不同, 柴油机排出的 CO₂ 和 HC 比汽油机少, 而 NO_x、微粒(PM)和 SO₂ 排放较多^[1]。为了保护环境, 我国和世界各国对内燃机的排放都提出了日趋严格的排放规定。柴油机排放中, SO₂ 主要是由于燃用的柴油中含硫量高引起的, 它可以通过规范燃用柴油含硫量的标准, 达到降低 SO₂ 和硫酸盐(微粒一种)的目的, 使符合排放规定。所以对柴油机而言, 如何在保持良好燃油经济性基础上, 降低 NO_x 和微粒的排放是柴油机排放净化课题主要任务。

1 NO_x 和微粒子排物的生成机理

根据 ZELDOVICH 理论^[2], 柴油机中可燃烧混合气在氧气过剩区燃烧会产生 NO, 反应式如下:



反应是可逆的, NO 的初始浓度为零, 燃烧至某一时刻, NO 浓度即为此时的平衡浓度。燃料本身不会产生大量的氮氧化物, 而是进入燃烧室空气中氧和氮在燃烧高温中的产物。对 NO 生成速度影响最大的是温度, 当燃烧温度控制在 1700K 以下, NO 生成速度明显下降, 温度升高, NO 的生成率将呈指数函数的规律上升^[3]。燃烧过程中其他的因素会通过它对燃烧温度的影响, 改变 NO 生成速度。如燃烧过程中, 湿度升高, 由于它会降低燃烧的最高温度, 因而减少了 NO 的产生。因此, 降低燃烧最高温度是控制 NO_x 产生的最主要途径。而同一温度下, 混合气浓度稀, 则因氧原子浓度增加, NO 增加。

微粒子排物是几种呈固态或液态的微粒, 它由可溶性有机物和非可溶性物(主要是干碳烟)构成, 是燃烧过程中由于在可燃混合气过浓区域, 碳氢燃料(包括燃料、润滑油)不完全燃烧裂解生成的。所以要降低燃烧微粒子排物就要加强空气与燃料的混合, 提高温度使燃料完全燃烧, 显然 NO_x 的控制途径和降低微粒子的途径存在着矛盾, 要使柴油机排气净化, 应采用各种对降低 NO_x 和微

收稿日期: 2000-10-23

作者简介: 陈 剑(1946-), 男, 上海师范大学犹他科技学院高级工程师。

粒子的排放水平都有益的技术,使 NO_x 和微粒子总体排放水平满足排放规定。

2 柴油机排放净化对策

2.1 燃烧控制

要同时降低 NO_x 和微粒子(PM),最主要是对柴油机内部进行技术改进,改变并控制燃烧过程。图1是柴油机的燃烧放热率图,线1是现有柴油机放热率曲线,很明显,燃烧初期该曲线陡而放热率高,因而燃烧温度高,加速 NO_x 的产生,在燃烧中期放热率低,燃烧温度低,易产生PM。线2是燃烧较理想的曲线,燃烧初期曲线稍平缓,最大放热率明显下降,降低初始燃烧温度,降低了 NO_x ,中期放热率的提高使扩散燃烧完全、快速,燃烧温度相对提高,减少PM产生。同时缩短扩散燃烧(提前结束喷油),以改善燃油经济性,进一步降低PM。实现这种较理想的燃烧过程需要有一系列技术措施作为保障。

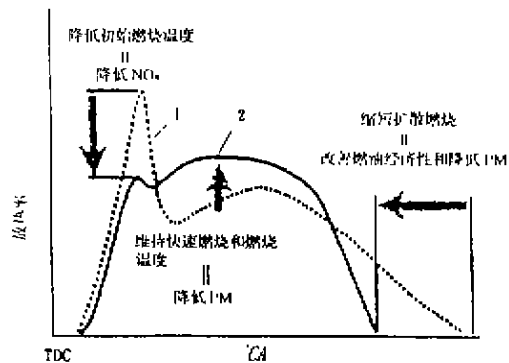


图1 柴油机燃烧放热率

2.1.1 喷油系统控制

喷油系统控制是通过喷油压力、喷油定时、喷油量、喷油率、喷油形状等各指标来实现的。图1曲线2与曲线1相比,燃烧初期预混合燃烧比例小,中期扩散阶段燃烧速率加快,缩短燃烧时间。为此,燃烧初期对喷油系统控制的要求是:

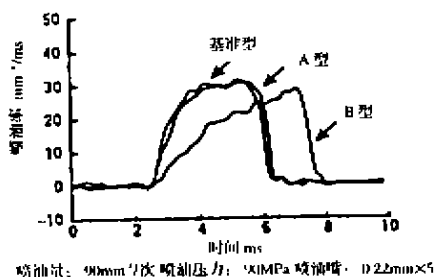


图2 控制针阀升程得到的喷油率波形

(1) 降低喷射率:通过减少初期的供油量以改变喷油率初期波形,降低燃烧最高温度,减少 NO_x 的产生。有人曾做实验,表1为实验用单缸无增压直喷柴油机的技术系数,图2是通过控制喷油嘴针阀升程对初期喷油量进行抑制的实验结果:A型为对初期喷油量抑制作用小的喷油率波形,B型为对初期喷油量抑制作用大的喷油率波形^[4]。显然B型通过降低喷射率所得的逐步向上爬行的曲线更符合初期燃烧预混合燃烧少的要求。

改变喷油率除上述的通过升程控制外,还有通过压力控制,即喷油时实现压力转换:初期燃烧为低压喷射中期改为高压喷射。但有资料表明:由于喷射初期压力低,故在喷嘴附近引起着火,其后燃油高压时被喷向火焰内,因此不太能向油束内导入空气,使扩散燃烧缓慢,等容度下降,油耗恶化,几乎没有改善PM(碳烟)的效果,但 NO_x 获得改善。

表1 发动机技术参数

发动机型式	缸径×行程(mm)	排量(L)	燃油喷射装置	调速比
单缸、直喷、自然吸气	115×132	1.37	共轨系统	K=2.5

(2) 高压喷射:提高喷射压力时,由于高速流动中的油束分裂成微小油滴,使卷入的新鲜空气

增多(图3),油气混合速率提高.对于采用EGR循环的柴油机,因进气含氧相对减少,使混合质量提高更显重要.因此,高压喷射可以提高混合质量,缩短燃烧时间,改善燃烧,减少PM产生.

(3) 延迟喷油定时:高压喷射改善了燃烧,提高了燃烧温度,会使NO_x增加,但由于高压喷射缩短了燃烧时间,所以可通过延迟喷油定时以降低NO_x的产生.

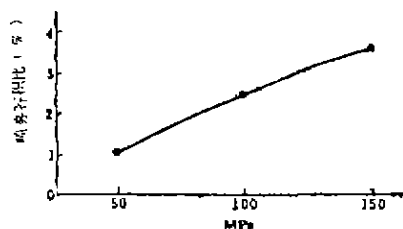


图3 喷油压力对喷雾容积比的影响

中期燃烧对喷油系统控制的要求:高压喷射、提高喷油率,缩短喷油持续期.由于喷射压力高,喷油量大,使大量燃油与空气充分混合,等容度提高,扩散燃烧变得活跃,加快燃烧速度、温度提高,燃烧完全,从而减少PM的生成(图2中B型喷油率波形最大喷油率在喷油线后期).

后期燃烧对喷油系统控制要求:快速停喷使燃气在停止供油后有时间与空气强烈混合,氧化掉已生成的大部分碳烟,降低PM的产生.中后期

燃烧过程中因燃烧活跃,NO_x会增加,但因初期燃烧,NO_x的生成得到控制,使整个燃烧过程同时实现NO_x和PM的降低.

(4) 喷孔的结构与直喷柴油机燃烧室搭配.以多孔、孔径适宜为宜.过大孔径抑制了喷雾的细化,与空气混合变差,使燃烧速度减慢,PM增加,孔径过小,使喷油时间延长,也会使PM恶化.

由上可知:实现理想的燃烧过程的要求是喷油系统能按燃烧的需要提供高压或超高压喷射压力;控制喷嘴针阀升程,实现喷油率的变化;喷油的快速停喷和合适的喷孔结构.

2.1.2 提高油气混合率

燃油与空气的混合除了与喷油压力有关外,还与进气涡流强度、燃烧室形状、进排气门结构等有关.

(1) 涡流强度:最大喷射压力达180MPa时,有无进气涡流对燃烧影响不大,但最大喷射压力小于180MPa时,涡流是需要的.随着喷油压力的提高,喷嘴喷孔的减小,最佳进气涡流比有降低趋势.涡流比降低有助于减少燃烧初期预混合燃烧的百分比,使NO_x排放得到改善,同时低涡流的进气道进气阻力小,改善燃烧使烟度降低.

(2) 燃烧室形状对柴油机性能和排放有较大的影响,车用直喷柴油机被推荐并已被广泛采用的燃烧室是缩口燃烧室.这种燃烧室在喷射压力60~130MPa工作较好,由于缩口燃烧室压缩时产生强烈的压缩挤流,挤压涡流一直延续到上止点,涡流提供混合所需的能量,它将燃油与空气迅速形成可燃混合气,上止点过后涡流值并不明显下降,所以缩口燃烧室的中低速性能也较好.对有些燃烧室如四角形燃烧室,由于燃烧室缩口处呈四方形,它成了涡流与旋转运动的障碍物,产生气流运动的“摩擦碰撞壁现象”,并随气流旋转速度加大而加大,抑制涡流的增强,抑制燃烧速度和温度的增大,控制了NO_x的生成.由于缩口燃烧室缩口处温度高,易热裂烧蚀,所以缩口尺寸应视具体情况综合匹配试验而定.

(3) 采用多气门(如4气门)技术是车用直喷柴油机满足未来更严格排放指标的有效途径.在多气门结构缸盖上,喷油嘴可以垂直放置在气缸中央,使多孔喷嘴喷出油束处于均匀分布的理想状态.活塞上燃烧室凹坑也是布置在气缸中央,使活塞顶燃烧室形成均匀气流,优化了进气涡流和油雾的分布,实现最佳的空气利用率.如果控制空气道进气量,可在不同转速、负荷下实现不同的涡流比,使缸内气流在整个转速和负荷范围内保持最佳状态,提高了柴油机的动力性、经济性,并明显降低NO_x和PM的排放量.

2.2 废气再循环控制

气再循环(EGR)在所有负荷条件下都可有效抑制NO_x排放^[3].柴油机使用EGR时,由于柴油

机进气总量不会变化,废气加入后吸人气缸中新鲜空气的氧浓度下降,使混合气的空燃比 A/F 减少,单位质量混合气的放热量减少.其次,吸入的废气温度高虽然会使着火延迟期缩短,但由于 N_2 、 CO_2 大量增加,置换了氧,反使着火延迟期延长了.所以采用 EGR 降低了初期燃烧的放热率和最高温度,使 NO_x 大幅下降,但油耗及 PM 排放上升了.如果废气经冷却后进入进气管,则着火延迟期更长, NO_x 下降幅度更大.

为了使柴油机有害排放物 NO_x 能明显下降,而 PM 上升幅度又不太明显,应对废气再循环实行控制寻找一个合适的废气再循环率.废气再循环率:

$$R = (V_0 - V_E) / V_0 = 1 - V_E / V_0$$

其中: V_0 : 无废气再循环时吸人气缸新鲜空气量 (m^3), V_E : 有废气再循环时吸人气缸新鲜空气量 (m^3).

图4是一柴油机在40%和60%负荷时所测出废气再循环率 R 与各种排气成分之间的关系^[4],从中可见: NO_x 随废气循环率 R 增加有明显降低,当 R 为

20%~30%时两种负荷下的 NO_x 排放降低了60%~80%,同时 CO 、 HC 及 PM 的排出量也没有大幅增加,所以将废气再循环按运行工况控制在适当范围,一方面可降低 NO_x ,同时又能抑制 CO 、 HC 、 PM 的排放.柴油机中速运行时,各种负荷情况下采用 EGR(包括大负荷), NO_x 都会减少.低速高负荷时因采用 EGR 会使空燃比降低,所以可不采用 EGR.怠速空转时,由于空燃比大,可采用高达50%的废气再循环以降低 NO_x 生成. NO_x 的降低与 EGR 的温度有很强的依赖关系,对 EGR 进行冷却,冷却后的 EGR 因延长着火落后期使柴油机排放情况会大有改善^[6].

2.3 废气涡轮增压和中冷

废气涡轮增压是通过增加新鲜空气的供给量,采用较大的过量空气系数 λ ,保证了足够的新鲜空气裕度,使燃油分子更多的接触机会,保证燃烧的完全,因而降低了 PM 排放和油耗.由于增压的热负荷较高,进气温度高, NO_x 排放较大,采用增压并经中冷后,使进气一般由 $130^\circ \sim 160^\circ C$ 降至 $50^\circ C$ 左右送人气缸,温度明显降低,密度提高,使柴油机除了提高功率外,PM 得到降低(图5),同时也因燃烧的峰值温度降低, NO_x 下降,所以废气涡轮增压加中冷是同时降低 NO_x 、PM 排放的有效措施,如加上冷却的 EGR 系统则效果更佳.

3 柴油机排放净化控制的手段

3.1 电子控制技术

随着人们对车用柴油机节能、排放要求的日趋严格,对柴油机的调节、控制提出了电子控制的要求.

电子控制系统由传感器、电子控制单元(ECU)和执行器几部分组成.车用柴油机以转速、油门踏板位置作为工况信号通过传感器传给 ECU.同时传感器还将水温、油温、进气温度、压力等环境指标和车速信号传给电子控制系统.电子控制单元参照柴油机及整车试验得的 MAP 选择控制目标值^[6],对执行器发出动作指令,由执行器执行.而执行信号反馈传感器则把执行器的运行情况反

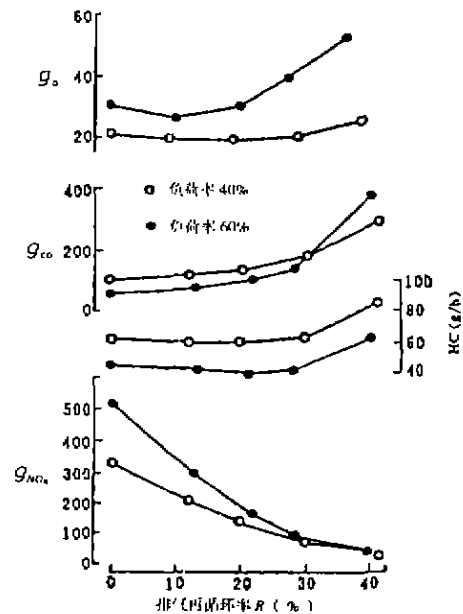


图4 R 与各种排气成分之间的关系

馈给电子控制单元,实行对执行器的闭环控制。

3.2 共轨式电控喷油系统

共轨式电控喷油系统省去了现有柴油机供油系统中一系列部件,结构简单,并可以对喷油压力、喷油定时、喷油量、喷油率按理想的放热率(燃烧初期、中期、后期)灵活控制。因此它是实现柴油机排放净化控制的关键装置,是车用柴油机的最佳选择。

4 结 论

实现降低车用直喷柴油机燃烧过程不同阶段 NO_x、PM 的产生是净化排放的主要途径。用计算机对喷油系统、EGR 系统、进气系统等实行电控,是按净化排放要求改变燃烧过程的保证。共轨电控喷油系统是实现电控喷油,满足燃烧要求的最佳装置。在我国,研制共轨电控喷油系统、实现柴油机电控技术、测定最佳燃烧过程控制参数是近期面临的任务。

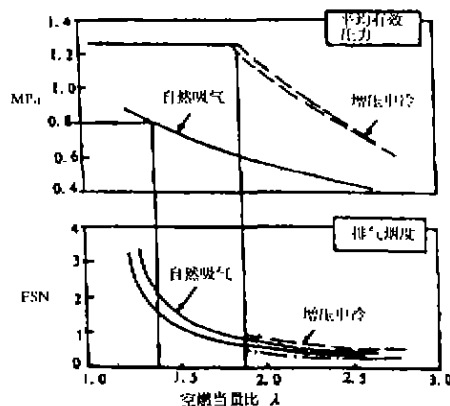


图5 最大扭矩工况 λ 对排气烟度和平均有效压力的影响

参考文献:

- [1] 魏善镇. 内燃机低污染化[J]. 柴油机设计制造, 1999(1).
- [2] RIOHARD F ABRAMS. Control Diesel Soot, Hydrocarbon and NO_x Emission with a Particulate Trap and EGR [J]. SAE paper, 1994.
- [3] 童澄教. 内燃机排放与净化[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1994.
- [4] [日]高格, 左滕敬一. 直喷式柴油机喷油率波形对燃烧和排放的影响[J]. 国外内燃机, 1999(2).
- [5] 曲明辉. 采用废气再循环降低柴油机 NO_x 排放[J]. 小型内燃机, 2000(2).
- [6] 蔡逢生. 车用柴油机电控技术综述[J]. 柴油机设计与制造, 1999(4).

An Overview on the Reduction of NO_x and Particulates from Automotive Direct Injection Diesel Engines

CHEN Jian

(College of Utah Sciences and Technology, Shanghai Teachers University, Shanghai 200234, China)

Abstract: In this article, it is elucidated that optimizing the combustion process is a fundamental way for purifying the exhaust emissions from automotive direct injection diesel engines. It introduces the possibility of optimizing the combustion process through effectively controlling the fuel injection system, the induction system, the exhaust gas recirculation, the supercharging & intercooling by means of electrical control techniques.

Key words: direct injection diesel engine; purification of exhaust emissions; control over combustion